

# **JP8331823**

Publication Title:

## **DC BRUSHLESS MOTOR AND CONTROLLER**

Abstract:

Abstract of JP8331823

**PURPOSE:** To further expand the operating range of a DC brushless motor using a rotor provided with permanent magnets for field at a continuous rated current. **CONSTITUTION:** A DC brushless motor is constituted of an armature 31 and rotor 32. The rotor 32 is provided with a rotor yoke having four main poles 321 on its outer periphery. In each main pole 321 of the rotor yoke, a slot 322 having a diametral size of Lm is formed and a permanent magnet 323 for field having a thickness of nearly Lm is buried in each slot 322. The size Lm and the length Lg of the air gap between the rotor 32 and armature 31 are decided so that they can meet a relation,  $0 < Lm + Lg \leq 2\text{mm}$ .

Data supplied from the [esp@cenet](mailto:esp@cenet) database - Worldwide

---

Courtesy of <http://v3.espacenet.com>

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平8-331823

(43)公開日 平成8年(1996)12月13日

(51) Int.Cl. <sup>6</sup>	識別記号	序内整理番号	F I	技術表示箇所
H 02 K 29/00			H 02 K 29/00	Z
1/10			1/10	
1/16			1/16	Z
1/27	501		1/27	501B 501C

審査請求 未請求 請求項の数17 O L (全 15 頁) 最終頁に統く

(21)出願番号 特願平8-2691  
(22)出願日 平成8年(1996)1月10日  
(31)優先権主張番号 特願平7-66577  
(32)優先日 平7(1995)3月24日  
(33)優先権主張国 日本 (JP)

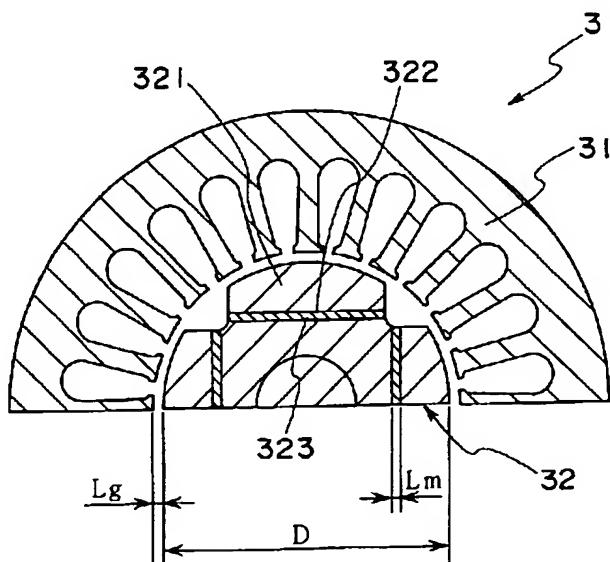
(71)出願人 000002369  
セイコーエプソン株式会社  
東京都新宿区西新宿2丁目4番1号  
(72)発明者 植竹 昭仁  
長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコ  
ーエプソン株式会社内  
(72)発明者 山岸 善彦  
長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコ  
ーエプソン株式会社内  
(74)代理人 弁理士 鈴木 喜三郎 (外1名)

(54)【発明の名称】 DCブラシレスモータおよび制御装置

(57)【要約】

【課題】界磁用永久磁石を有する回転子を備えたDCブラシレスモータにおいて、連続定格電流での運転範囲をさらに拡大することを目的とする。

【解決手段】DCブラシレスモータ3は、電機子31と、回転子32とで構成されている。回転子32は、外周部に4つの主磁極321を有する回転子ヨークを備えている。回転子ヨークの各主磁極321には、径方向寸法がLmのスロット322が形成されており、各スロット322には、厚さがほぼLmの界磁用永久磁石323が埋め込まれている。この場合、スロット322の径方向寸法Lmと、回転子32と電機子31との間に形成されたエアギャップのエアギャップ長Lgとが、 $0 < Lm + Lg \leq 2\text{mm}$ を満足するよう設定されている。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 外周部に2つ以上の主磁極を有する回転子ヨークを備えた回転子と、電機子とを有するDCブラシレスモータにおいて、前記主磁極に径方向寸法がLmのスロットが形成され、該スロットに厚さがほぼLmの界磁用永久磁石が挿入されており、前記回転子と前記電機子との間に形成されたエアギャップのエアギャップ長をLgとしたとき、 $0 < Lm + Lg \leq 2\text{mm}$ を満足するよう設定されていることを特徴とするDCブラシレスモータ。

【請求項2】 外周部に2つ以上の主磁極を有する回転子ヨークを備えた回転子と、電機子とを有するDCブラシレスモータにおいて、前記主磁極に径方向寸法がLmのスロットが形成され、該スロットに厚さがほぼLmの界磁用永久磁石が挿入されており、前記回転子と前記電機子との間に形成されたエアギャップのエアギャップ長をLgとしたとき、 $0.3\text{mm} \leq Lm + Lg \leq 2\text{mm}$ を満足するよう設定されていることを特徴とするDCブラシレスモータ。

【請求項3】 外周部に2つ以上の主磁極を有する回転子ヨークを備えた回転子と、電機子とを有するDCブラシレスモータにおいて、前記主磁極に径方向寸法がLmのスロットが形成され、該スロットに厚さがほぼLmの界磁用永久磁石が挿入されており、前記回転子と前記電機子との間に形成されたエアギャップのエアギャップ長をLgとしたとき、 $0.3\text{mm} \leq Lm + Lg \leq 1.3\text{mm}$ を満足するよう設定されていることを特徴とするDCブラシレスモータ。

【請求項4】 前記回転子の最大外径をDとしたとき、 $0 < Lm + Lg \leq 2D/5$ を満足するよう設定されている請求項1ないし3のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【請求項5】 外周部に2つ以上の主磁極を有する回転子ヨークを備えた回転子と、電機子とを有するDCブラシレスモータにおいて、前記主磁極に径方向寸法がLmのスロットが形成され、該スロットに厚さがほぼLmの界磁用永久磁石が挿入されており、前記回転子と前記電機子との間に形成されたエアギャップのエアギャップ長をLg、前記回転子の最大外径をDとしたとき、 $0 < Lm + Lg \leq 2D/5$ を満足するよう設定されていることを特徴とするDCブラシレスモータ。

【請求項6】 前記界磁用永久磁石は、前記主磁極に挿入された状態で着磁されたものである請求項1ないし5のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【請求項7】 前記界磁用永久磁石の着磁用コイルとし

て前記電機子の電機子巻線を使用する請求項1ないし6のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【請求項8】 前記回転子ヨークの隣接する主磁極と主磁極との間に該回転子ヨークの一部を突出させた補助突極が形成され、かつ、前記補助突極と前記電機子との間に所定長のエアギャップが形成されている請求項1ないし7のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【請求項9】 外周部に2つ以上の主磁極を有する回転子ヨークを備えた回転子と、電機子とを有するDCブラシレスモータにおいて、

前記主磁極にスロットが形成され、該スロットに界磁用永久磁石が挿入されており、

前記回転子ヨークの隣接する主磁極と主磁極との間に該回転子ヨークの一部を突出させた補助突極が形成され、かつ、前記補助突極と前記電機子との間に所定長のエアギャップが形成されていることを特徴とするDCブラシレスモータ。

【請求項10】 前記補助突極は、前記回転子ヨークの回転軸の中心部から放射状に突出している請求項8または9に記載のDCブラシレスモータ。

【請求項11】 前記補助突極は、少なくとも先端部に、先端に向ってその断面積が漸増する部分を有する請求項8ないし10のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【請求項12】 前記補助突極の少なくとも先端部が前記主磁極から分離・独立して形成されている請求項8ないし11のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【請求項13】 前記回転子ヨークの回転軸の中心部から前記補助突極の先端部までの長さは、前記回転子ヨークの回転軸の中心部から前記主磁極の先端部までの長さ以下に設定されている請求項8ないし12のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【請求項14】 前記回転子ヨークの回転軸の中心部から前記補助突極の先端部までの長さは、前記回転子ヨークの回転軸の中心部から前記主磁極の先端部までの長さより長く、かつ、前記回転子ヨークの回転軸の中心部から前記主磁極の先端部までの長さに前記エアギャップ長Lgを加えた長さよりも短く設定されている請求項8ないし12のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【請求項15】 前記電機子ヨークの巻線部スロット幅角度寸法を $\theta_2$ 、前記電機子ヨークのスロット歯部角度寸法を $\theta_1$ 、前記回転子の主磁極端部から補助突極端部までの角度寸法を $\gamma$ とするとき、 $\gamma > \theta_1 + \theta_2$ の関係を満足するよう設定されている請求項8ないし14のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【請求項16】 前記電機子ヨークの巻線部スロット幅角度寸法を $\theta_2$ 、前記電機子ヨークのスロット歯部角度寸法を $\theta_1$ 、前記回転子の主磁極端部から補助突極端部までの角度寸法を $\gamma$ とするとき、 $\gamma = \theta_1 + 2\theta_2$ の関係を満足するよう設定されている請求項8ないし14の

いずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【請求項17】 請求項1ないし16のいずれかに記載のDCブラシレスモータの駆動を制御する制御装置であって、

前記DCブラシレスモータの回転子位置を検出する回転子位置検出手段と、前記DCブラシレスモータの電機子電流を検出する電流検出手段とを有し、かつ、前記DCブラシレスモータを連続して運転することができる最大の電機子電流を  $I_{mr}$  としたとき、d軸電流が  $I_{mr}$  を超えないよう電機子電流を制御するインバータ制御部を有することを特徴とする制御装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、界磁用永久磁石を有するDCブラシレスモータおよび制御装置に関する。

【0002】

【従来の技術】 DCブラシレスモータにはその回転子構造で分類された2つの種類がある。そのうちの1つは、回転子ヨークの表面に界磁用永久磁石を装着した表面磁石型であり、もう1つは、回転子ヨークの内部に界磁用永久磁石を埋め込んだ埋め込み型である。

【0003】 これら回転子構造が異なる2種のうち、表面磁石型の回転子では、高速回転時の遠心力による界磁用永久磁石の破壊を防ぐためステンレス管を装着する構造が一般的に採られている。以上の構造のため、表面磁石型の回転子の場合、界磁用永久磁石と、回転子ヨークと、電機子とで構成される磁気回路の磁気抵抗が大きくなる傾向があり、また、モータを数k~20kH<sub>z</sub>にチョッピングされた電源で駆動するため、ステンレス管に渦電流が流れ、これがモータ効率を悪化させる原因となる。

【0004】 一方、埋め込み型の回転子では、回転子ヨークの内部に、界磁用永久磁石を挿入するスロットを予め回転子ヨークを打ち抜く際に形成するので、ステンレス管を使用する必要がなく、このため渦電流の発生を大幅に減少させることができる。

【0005】 しかし、スロットの構成によっては漏洩磁束が増加し、磁気回路の有効磁束数が減少して、磁石の有効活用が図れなくなることから、これを防止する工夫が必要である。

【0006】 前記2種の回転子は、これらの構造上の違いから機器定数も大きく変わり、その結果、モータ出力特性も大きく異なる。なお、永久磁石の透磁率は、真空の透磁率に近いため永久磁石のある部分は空気と等価と考える。

【0007】 表面磁石型回転子構造のモータは、d軸インダクタンスとq軸インダクタンスとが等しく、電流とトルクの線形性を有するので、加減速特性、トルク制御等、制御性が良好でありサーボモータに多く使用される。

【0008】 埋め込み型回転子構造のモータは、q軸インダクタンスがd軸インダクタンスよりも大きいという特徴を有する（逆突極性）。そのため永久磁石のアクティブラトルクだけでなく、リラクタンストルクを利用した最大トルク制御が可能であり、高出力・高効率な特性を得ることができる。

【0009】 また、埋め込み型回転子構造のモータでは、インバータ駆動装置のDCリンク電圧とモータの逆起電力とで制限される回転数以上の運転範囲について

10 も、逆起電力の位相に対して電機子電流の位相を制御することで電機子反作用を利用した等価弱め界磁制御によって運転を可能とすることができます。このため、埋め込み型回転子構造のモータは、小型・高効率でかつ広い運転範囲を持つことが要求される移動体駆動用モータとして有望なモータである。

【0010】 モータの運転には、連続して運転できる領域と、短時間であれば運転できる領域とがある。これはモータの温度上昇で決まる。詳細な説明は省略するが、それぞれ連続定格、短時間定格という。そして、連続定格時に流し続けられる電流を連続定格電流と呼ぶ。

【0011】 従来の埋め込み型回転子の構造を図20に示す。また、連続定格電流で従来の埋め込み型回転子構造のモータを運転した時の出力特性を図21に示す。

【0012】 図21に示すように、従来のモータをモータの逆起電力と電機子電流とが同位相となるように運転したとき ( $i_d = 0$  制御という) の最大の回転数と、弱め界磁制御によって運転したときの最大の回転数との比は、1.6である (9200/5600 r.p.m.)。

【0013】 すなわち、弱め界磁制御により、連続で運転できる回転数範囲を1.6倍まで拡大することができる。また、図示しないが連続定格電流以上の電流を電機子に流せばさらに運転範囲を拡大することができる。

【0014】

【発明が解決しようとする課題】 従来の埋め込み型回転子を有するDCブラシレスモータを従来の技術を用いて制御することで、小型・高効率でかつ広い運転範囲を持つことが可能である。

【0015】 しかしながら、前述した従来の埋め込み型回転子を有するDCブラシレスモータでは、連続定格電流での運転範囲の拡大は、1.6倍程度までが限界であり、さらに広い運転範囲を得るためにには、電機子電流が大きくなり、連続して運転することはできない。このため、例えば、移動体が高速巡航する場合において不都合を生じる。

【0016】 また、電気自動車や電気スクーターなど電池を電源とする移動体の駆動用モータにおいては、モータのみでなく制御装置、伝達機構をも含めて小型・高効率で広い運転範囲を持つことが要求される。

【0017】 しかしながら、従来例のモータを使用した場合、連続定格の範囲で移動体の運転速度範囲をさらに拡

大するためには、多段の变速機構を用いる必要があり、このため、装置が大型化してしまうという問題がある。

【0018】また、モータ自体の運転範囲を拡大するためには、大きな電機子電流を必要とする。よって、モータでは銅損の増加により発熱量が増加し、これにより運転可能な時間が短縮されてしまうので、従来では、モータ冷却効率を向上させる工夫が必要であり、このためモータが大型化するという問題点を有していた。また、制御装置では、インバータスイッチ素子の電流定格を大きくしなければならず、制御装置の大型化をまねくという問題点を有していた。

【0019】本発明の目的は、連続定格電流での運転範囲が広いDCブラシレスモータおよび制御装置を提供することにある。また、効率の良いDCブラシレスモータおよび制御装置を提供することにある。

#### 【0020】

【課題を解決するための手段】このような目的は、下記(1)～(17)の本発明により達成される。

【0021】(1) 外周部に2つ以上の主磁極を有する回転子ヨークを備えた回転子と、電機子とを有するDCブラシレスモータにおいて、前記主磁極に径方向寸法がLmのスロットが形成され、該スロットに厚さがほぼLmの界磁用永久磁石が挿入されており、前記回転子と前記電機子との間に形成されたエアギャップのエアギャップ長をLgとしたとき、 $0 < Lm + Lg \leq 2\text{mm}$ を満足するよう設定されていることを特徴とするDCブラシレスモータ。

【0022】(2) 外周部に2つ以上の主磁極を有する回転子ヨークを備えた回転子と、電機子とを有するDCブラシレスモータにおいて、前記主磁極に径方向寸法がLmのスロットが形成され、該スロットに厚さがほぼLmの界磁用永久磁石が挿入されており、前記回転子と前記電機子との間に形成されたエアギャップのエアギャップ長をLgとしたとき、 $0.3\text{mm} \leq Lm + Lg \leq 2\text{mm}$ を満足するよう設定されていることを特徴とするDCブラシレスモータ。

【0023】(3) 外周部に2つ以上の主磁極を有する回転子ヨークを備えた回転子と、電機子とを有するDCブラシレスモータにおいて、前記主磁極に径方向寸法がLmのスロットが形成され、該スロットに厚さがほぼLmの界磁用永久磁石が挿入されており、前記回転子と前記電機子との間に形成されたエアギャップのエアギャップ長をLgとしたとき、 $0.3\text{mm} \leq Lm + Lg \leq 1.3\text{mm}$ を満足するよう設定されていることを特徴とするDCブラシレスモータ。

【0024】(4) 前記回転子の最大外径をDとしたとき、 $0 < Lm + Lg \leq 2D/51$ を満足するよう設定されている上記(1)ないし(3)のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

#### 【0025】(5) 外周部に2つ以上の主磁極を有す

る回転子ヨークを備えた回転子と、電機子とを有するDCブラシレスモータにおいて、前記主磁極に径方向寸法がLmのスロットが形成され、該スロットに厚さがほぼLmの界磁用永久磁石が挿入されており、前記回転子と前記電機子との間に形成されたエアギャップのエアギャップ長をLg、前記回転子の最大外径をDとしたとき、 $0 < Lm + Lg \leq 2D/51$ を満足するよう設定されていることを特徴とするDCブラシレスモータ。

【0026】(6) 前記界磁用永久磁石は、前記主磁極に挿入された状態で着磁されたものである上記(1)ないし(5)のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【0027】(7) 前記界磁用永久磁石の着磁用コイルとして前記電機子の電機子巻線を使用する上記(1)ないし(6)のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【0028】(8) 前記回転子ヨークの隣接する主磁極と主磁極との間に該回転子ヨークの一部を突出させた補助突極が形成され、かつ、前記補助突極と前記電機子との間に所定長のエアギャップが形成されている上記(1)ないし(7)のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【0029】(9) 外周部に2つ以上の主磁極を有する回転子ヨークを備えた回転子と、電機子とを有するDCブラシレスモータにおいて、前記主磁極にスロットが形成され、該スロットに界磁用永久磁石が挿入されており、前記回転子ヨークの隣接する主磁極と主磁極との間に該回転子ヨークの一部を突出させた補助突極が形成され、かつ、前記補助突極と前記電機子との間に所定長のエアギャップが形成されていることを特徴とするDCブラシレスモータ。

【0030】(10) 前記補助突極は、前記回転子ヨークの回転軸の中心部から放射状に突出している上記(8)または(9)に記載のDCブラシレスモータ。

【0031】(11) 前記補助突極は、少なくとも先端部に、先端に向ってその断面積が漸増する部分を有する上記(8)ないし(10)のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【0032】(12) 前記補助突極の少なくとも先端部が前記主磁極から分離・独立して形成されている上記(8)ないし(11)のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【0033】(13) 前記回転子ヨークの回転軸の中心部から前記補助突極の先端部までの長さは、前記回転子ヨークの回転軸の中心部から前記主磁極の先端部までの長さ以下に設定されている上記(8)ないし(12)のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

【0034】(14) 前記回転子ヨークの回転軸の中心部から前記補助突極の先端部までの長さは、前記回転子ヨークの回転軸の中心部から前記主磁極の先端部まで

の長さより長く、かつ、前記回転子ヨークの回転軸の中心部から前記主磁極の先端部までの長さに前記エアギャップ長 $L_g$ を加えた長さよりも短く設定されている上記(8)ないし(12)のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

**【0035】(15)** 前記電機子ヨークの巻線部スロット幅角度寸法を $\theta_2$ 、前記電機子ヨークのスロット歯部角度寸法を $\theta_1$ 、前記回転子の主磁極端部から補助突極端部までの角度寸法を $\gamma$ とするとき、 $\gamma > \theta_1 + \theta_2$ の関係を満足するよう設定されている上記(8)ないし(14)のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

**【0036】(16)** 前記電機子ヨークの巻線部スロット幅角度寸法を $\theta_2$ 、前記電機子ヨークのスロット歯部角度寸法を $\theta_1$ 、前記回転子の主磁極端部から補助突極端部までの角度寸法を $\gamma$ とするとき、 $\gamma = \theta_1 + 2\theta_2$ の関係を満足するよう設定されている上記(8)ないし(14)のいずれかに記載のDCブラシレスモータ。

**【0037】(17)** 上記(1)ないし(16)のいずれかに記載のDCブラシレスモータの駆動を制御する制御装置であって、前記DCブラシレスモータの回転子位置を検出する回転子位置検出手段と、前記DCブラシレスモータの電機子電流を検出する電流検出手段とを有し、かつ、前記DCブラシレスモータを連続して運転することができる最大の電機子電流を $I_{mr}$ としたとき、d軸電流が $I_{mr}$ を超えないよう電機子電流を制御するインバータ制御部を有することを特徴とする制御装置。

**【0038】**

【発明の実施の形態】以下、本発明のDCブラシレスモータおよび制御装置を添付図面に示す好適実施例に基づいて詳細に説明する。

**【0039】(実施例1)** 図1は、本発明のDCブラシレスモータおよび制御装置の構成例を示すブロック図である。同図に示すように、本発明の制御装置は、DCブラシレスモータ(モータ)3の駆動を制御するモータ制御装置であり、DCブラシレスモータ3の回転子位置を検出する回転子位置検出手段4と、DCブラシレスモータ3の電機子電流を検出する電流検出手段5と、3相PWMインバータ(インバータ)2と、3相PWMインバータ2の作動を制御するインバータ制御部6とを有している。

**【0040】** この制御装置では、直流電源1から所定の直流電圧が3相PWMインバータ2に供給(印加)され、この3相PWMインバータ2により3相交流電圧が生成される。そして、前記3相PWMインバータ2により、DCブラシレスモータ3の電機子巻線(3相電機子巻線)に所定のパターンで通電する。

**【0041】** この場合、回転子位置検出手段4によって検出、生成された回転子位置信号と、電流検出手段5によって検出、生成された電流信号(検出電流)と、速度指令とが、それぞれ、インバータ制御部6に入力され、

インバータ制御部6は、これら回転子位置信号と、電流信号と、速度指令とに基づいて、3相PWMインバータ2の作動を制御し、DCブラシレスモータ3を運転(駆動)する。

**【0042】** 図2は、本発明のDCブラシレスモータの構成例を示す要部断面図である。同図に示すように、本発明のDCブラシレスモータ3は、電機子31と、図示しない回転軸によって支持された回転子32とで構成されている。電機子31と回転子32との間には、エアギャップが設けられており、回転子32は、一定のエアギャップ長 $L_g$ を保ちながら回転し得るようになっている。

**【0043】** 電機子31は、積層された複数枚の鋼板(金属板)により構成された電機子ヨーク(電機子鉄心)を有している。この電機子ヨークには、図示しない3相電機子巻線が設けられている。

**【0044】** 回転子32は、外周部に2つ以上(本実施例では4つ)の主磁極321を有する回転子ヨークを備えている。この回転子ヨークは、積層された複数枚の鋼板(金属板)により構成されている。

**【0045】** 回転子ヨークの各主磁極321には、それぞれ、径方向寸法(径方向の長さ)が $L_m$ のスロット322が形成されている。そして、各スロット322には、それぞれ、厚さ(径方向の長さ)がほぼ $L_m$ (スロット322の径方向寸法 $L_m$ とほぼ同一)の界磁用永久磁石(磁石)323が埋め込まれている。

**【0046】** スロット322に挿入される界磁用永久磁石323の種類(例えば、組成)等は、特に限定されないが、例えば、希土類元素と、遷移金属と、ボロンとを基本成分とする希土類磁石のような優れた磁気特性の磁石を用いることが望ましい。

**【0047】** この場合、好適に使用される磁石の磁気特性としては、20°Cにおけるエネルギー積(BH)<sub>max</sub>は、20~50MGoe程度、また、飽和磁束密度B<sub>r</sub>は、9.0~14.0kG程度、また、保磁力H<sub>c</sub>は、15~25kOe程度が好ましい。

**【0048】** スロット322への界磁用永久磁石323の固定方法にはいくつかあるが、本実施例では、界磁用永久磁石323の寸法をスロット322よりわずかに小さく設定し、界磁用永久磁石323をスロット322へ挿入した後、回転子ヨークの軸方向両端面に図示しない非磁性板を被せることで固定している。この他にも例えば、界磁用永久磁石323をスロット322に圧入する方法、界磁用永久磁石323をスロット322に接着する方法などが挙げられ、それぞれに応じて、スロット322、界磁用永久磁石323の寸法を設定する。

**【0049】** このようなDCブラシレスモータは、電気子反作用を大きくするように、その諸寸法が設定される。すなわち、スロット322の径方向寸法 $L_m$ と、エアギャップ長 $L_g$ との関係が、 $0 < L_m + L_g \leq 2mm$ 、

好ましくは、 $0 < L_m + L_g \leq 1.3$ を満足するよう設定される。

【0050】 $L_m + L_g > 2$ であると、後述するように増速比が小さく、運転範囲が狭い。

【0051】以下、さらに詳細に説明する。d-q座標\*

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} -i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & L_q \\ -L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_{mag} \end{bmatrix}$$

【0053】ここで、 $\omega$ は、回転角速度、 $r$ は、電機子巻線抵抗、 $\phi_{mag}$ は、有効磁束数、 $v_d$ は、モータ端子電圧のd軸成分(d軸電圧)、 $v_q$ は、モータ端子電圧のq軸成分(q軸電圧)、 $i_d$ は、電機子電流のd軸成分(d軸電流)、 $i_q$ は、電機子電流のq軸成分(q軸電流)、 $L_d$ は、電機子インダクタンスのd軸成分(d軸インダクタンス)、 $L_q$ は、電機子インダクタンスのq軸成分(q軸インダクタンス)である。

【0054】モータ端子電圧V<sub>m</sub>と、DCブラシレスモータ3に印加できる最大の電圧、すなわち3相PWMインバータ2のDCリンク電圧Vとは、次式で表される関係※20

$$V \geq V_m = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} = \sqrt{(\omega L_q i_q)^2 + (-\omega L_d i_d + \omega \phi_{mag})^2}$$

【0058】この式は、例えば、 $i_d = 0$ 制御では回転速度が上昇し $V = V_m$ となると、それ以上回転速度を上昇させることができないことを示すが、 $i_d$ を流することで、 $v_q$ の項を小さくすることができ、さらに回転速度を上昇させることができることを示す。

【0059】ここで、回転速度をさらに上昇させるためのd軸電流について考える。界磁用永久磁石323の磁束を完全に打ち消すために必要なd軸電流を $i_{d0}$ とする、その $i_{d0}$ は、次式で示される。

【0060】

【数4】

$$i_{d0} = \frac{\phi_{mag}}{L_d}$$

【0061】数4は、 $\phi_{mag}$ を一定として考えると、 $L_d$ が大きい方が、すなわち電機子反作用の大きなモータが $i_{d0}$ を小さくすることができ、よって弱め界磁に必要な*i<sub>d</sub>*を小さくすることができる事を示している。

【0062】図3は、DCブラシレスモータの簡略化し

\* 系におけるDCブラシレスモータの電圧電流方程式は次式で与えられる。

【0052】

【数1】

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} -i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & L_q \\ -L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_{mag} \end{bmatrix}$$

10※係にあり、この関係が満足できる範囲での高速回転が可能となる。

【0055】

【数2】

$$V \geq V_m$$

【0056】数2に数1を代入して整理する。尚、高速回転においては電機子巻線抵抗rによる電圧降下の影響が小さいのでこれを無視して整理すると次式となる。

【0057】

【数3】

た磁気回路構成を示す回路図である。図3中、F<sub>m</sub>は、界磁用永久磁石323の起磁力、R<sub>g</sub>は、エアギャップの磁気抵抗、R<sub>m</sub>は、回転子32の界磁用永久磁石323を挿入するスロット部の磁気抵抗、R<sub>r</sub>は、回転子ヨークの磁気抵抗、R<sub>y</sub>は、電機子ヨークの磁気抵抗を示している。

30 【0063】通常、これらの磁気抵抗には、 $R_m > R_g >> R_y, R_r$ の関係がある。電機子反作用の強さは、この磁気回路の磁気抵抗の総和の逆数に比例するを考えることができるので、R<sub>m</sub>, R<sub>g</sub>の小さな磁気回路が構成できればL<sub>d</sub>の大きな、すなわち弱め界磁に必要な*i<sub>d</sub>*の小さなモータが実現できる。

【0064】次に、以上の理論に基づいて行った検討の結果を説明する。本実施例の2つのDCブラシレスモータ(本発明1、本発明2)と、従来のDCブラシレスモータとについて、下記表1に、磁気回路を構成する各寸法およびモータの諸特性をそれぞれ示す。

【0065】

【表1】

項目	本発明1	本発明2	従来例
$L_s$ [mm]	0.3	0.3	0.5
$L_m$ [mm]	1.0	1.7	2.7
$L_d$ [mH]	4.76	3.42	2.87
$L_q$ [mH]	6.27	6.63	5.61
$\phi_{mag}$ [wb]	0.077	0.087	0.088
$i_{do}$ [A]	16.2	25.4	30.7
$I_{mr}$ [A]	8.0	8.0	8.0

【0066】上記表1に示すように、従来例では、 $i_{do}$ がモータ連続定格電流値 $I_{mr}$ の3.8倍であるのに対し、本実施例のモータでは、 $i_{do}$ がモータ連続定格電流値 $I_{mr}$ の2~3.2倍であり、より電機子反作用を強く受けることが証明された。

【0067】図4は、本発明1の出力特性を示すグラフ、図5は、本発明2の出力特性を示すグラフである。

【0068】これらのグラフに示すように、 $i_d = 0$ で制御したときの最高回転速度に対して、モータ連続定格電流値 $I_{mr}$ で弱め界磁制御したときの最高回転速度の比(增速比)が、本発明1では4(4倍)、本発明2では2(2倍)になっている。

【0069】図6は、 $L_m + L_g$ と、增速比との関係を示すグラフである。同図に示すように、界磁用永久磁石323の厚さやエアギャップ長が小さいほど、より小さな電流で弱め界磁の効果が得られ、增速比が高い。なお、 $L_m + L_g$ の下限については、永久磁石の不可逆減磁の問題と、製造の容易性とを併せて定めるのが好ましい。

【0070】まず、減磁について説明する。図7に本発明1に使用した界磁用永久磁石の動作を説明するグラフを示す。使用した磁石は、 $(B \cdot H)_{max} = 32 \text{ MGOe}$ 、 $20^\circ\text{C}$ での $B_r = 11.5 \text{ kG}$ 、 $i_{Hc} = 21 \text{ kOe}$ 、厚み1mmであり、図7中に示す曲線および直線は、それぞれ、モータ運転最高温度 $100^\circ\text{C}$ での $4\pi I - H$ 、 $B - H$ の磁気履歴曲線と、外部から逆磁場を印加しないときの動作線Aおよび連続定格電流のすべてをd軸に流して逆磁場を与えたときの動作線Bである。

【0071】同図に示すように、動作線Bと $4\pi I - H$ 曲線との交点が動作点となるが、その動作点は、屈曲点よりも図7中右側にあり、不可逆減磁はほとんど起こることはない。図示しないが連続定格電流の2倍の電流を流しても不可逆減磁は起こらない。従って、短時間であれば2倍の電流をd軸に流すこともできる。

【0072】また、図示しないが連続定格電流での運転であって、かつ短時間であれば $130^\circ\text{C}$ まで運転が可能であり、充分な信頼性を確保できる。

【0073】また、信頼性にたいする安全率を下げることが可能であれば、磁石厚みを薄くすることができる。

【0074】また、さらに*i*  $H_c$ の高い磁石を使用すれば、不可逆減磁に対する余裕が増加する。

【0075】また、図7からは、それぞれの動作点での磁束密度から、磁束密度の減少率は0.58と計算され、約1/2の弱め界磁が可能であることがわかる。

【0076】次に、電機子31および回転子32の製造の容易性について説明する。エアギャップ長 $L_g$ は、電機子31、回転子32の加工精度と、電機子31、回転子32の同芯度によって影響され、通常は、組立、加工のバラツキを加味して $0.35 \sim 0.7 \text{ mm}$ 程度に設定するが、 $0.2 \text{ mm}$ 程度までは現状の構成で容易に小さくすることができる。

【0077】スロット322の径方向寸法 $L_m$ は、磁石の機械強度および磁石の減磁限界とを併せて決定する必要がある。

【0078】磁石の機械強度は、磁石加工上および磁石組み込み取扱い上必要となる強度でよいが、検討に使用したNd-Fe-Bの焼結希土類磁石は比較的脆弱であり、十分な強度を得るには、その厚さは、約 $0.8 \text{ mm}$ 程度を必要とする。Pr-Fe-Bの鋳造・圧延希土類磁石は機械強度が高いが、十分な強度を得るには、その厚さは、約 $0.1 \text{ mm}$ 程度を必要とする。

【0079】また、図7に示すように、磁石の減磁限界の面からは、その厚さをさらに薄くする事ができる。

【0080】よって、エアギャップ長 $L_g$ の最小値 $0.2 \text{ mm}$ と、スロット322の径方向寸法 $L_m$ の最小値 $0.1 \text{ mm}$ とを足した長さは、以上の理由により、最低 $0.3 \text{ mm}$ 程度に設定することが可能である。

【0081】従って、スロット322の径方向寸法 $L_m$ と、エアギャップ長 $L_g$ との関係が、 $0.3 \text{ mm} \leq L_m + L_g \leq 2 \text{ mm}$ を満足するよう設定されているのがより好ましく、 $0.3 \text{ mm} \leq L_m + L_g \leq 1.3 \text{ mm}$ を満足するよう設定されているのがさらに好ましい。

【0082】ここで、磁石厚みを $1.7 \text{ mm}$ 、エアギャップ長を $0.3 \text{ mm}$ に設定した本発明2のモータ( $L_m + L_g = 1.7 \text{ mm}$ )の出力特性を示す。図8は、本発明2の出力特性を示すグラフである。

$g = 2 \text{ mm}$ ) では、前述したように、 $i_d = 0$  制御での最大回転数と、連続定格電流で弱め界磁制御した時の最大回転数との比(增速比)が、2であり、連続定格電流での運転回転数範囲が2倍に拡大される。

【0083】よって、 $0.3 \text{ mm} \leq L_m + L_g \leq 2 \text{ mm}$ を満足するよう設定する場合には、モータの製造が容易であり、かつ、增速比を2以上にでき、すなわち、連続定格電流での運転回転数範囲を2倍以上に拡大することができる。

【0084】增速比が2以上であれば、例えば、電気スクータ等において、変速機構を3段式から2段式のものに変更することができ、すなわち、変速機構等の動力伝達機構を簡略化、小型化することが可能である。

【0085】また、磁石厚みを1mm、エアギャップ長を $0.3 \text{ mm}$ に設定した本発明1のモータ( $L_m + L_g = 1.3 \text{ mm}$ )では、前述したように、增速比が4であり、連続定格電流での運転回転数範囲が4倍に拡大される。

【0086】よって、 $0.3 \text{ mm} \leq L_m + L_g \leq 1.3 \text{ mm}$ を満足するよう設定する場合には、モータの製造が容易であり、かつ、增速比を4以上にでき、すなわち、連続定格電流での運転回転数範囲を4倍以上に拡大することができる。

【0087】增速比が4以上であれば、例えば、電気スクータ等、比較的最高速度の低い移動体では、変速機構を省略することが可能であり、動力伝達機構等を含めた装置全体の小型化に寄与する。

【0088】既に、磁石の減磁について図7を用いて説明したが、さらに磁石表面各所の減磁について検討する。

【0089】図8に、d軸に電流を流さない場合と、連続定格電流をd軸に流して逆磁場を与えた場合の磁石表面磁束密度をFEMによって解析した結果を示す。この解析に使用した本発明における界磁用永久磁石323は、モータ軸方向断面形状が長方形(矩形)のものであり、図8に示すグラフの横軸は、磁石厚さ方向に垂直な方向での位置、すなわち磁石幅方向での位置を示す。

【0090】このグラフから、磁石の幅方向端部の表面磁束密度が中央部の表面磁束密度に比べ低下していることがわかる。このままでも不可逆減磁を起こして性能を低下させることはないが、端部に面とりを施し、減磁界の影響を緩和させることができ望ましい。

【0091】本発明1の界磁用永久磁石323の厚さは、1mmであり、磁石単体でのパーミアンスは、0.06と非常に小さいため着磁には $30 \text{ kOe}$ 以上の磁界が必要であり、また、磁石単体では反磁界が大きいため、磁石単体で着磁した後に磁気回路に組み込んだ場合、有\*

$$0 < L_m + L_g \leq 2 \times D / 51$$

$$0 < L_m + L_g \leq 1.3 \times D / 51$$

$L_m + L_g > 2 \times D / 51$ であると、增速比が小さく、モータの運転範囲が狭い。

\* 効磁束数も減少してしまう。

【0092】よって、界磁用永久磁石323を回転子ヨークの主磁極321に埋め込んで磁気回路を構成した後に着磁するのが望ましい。このように界磁用永久磁石323を主磁極321に埋め込んだ状態で着磁を行うことにより、界磁用永久磁石323の着磁時のパーミアンスが向上するので着磁が容易となり、これによりモータ生産性が向上し、また、有効磁束数を増加させることができる。さらに、界磁用永久磁石323を未着磁の状態で主磁極321に組み込めるので、磁気吸引力の影響を受けることがなく、モータ生産性が向上するという利点を有する。

【0093】この場合、例えば、回転子32の外周に着磁ヨークを配置し、エアギャップ長を $0.1 \text{ mm}$ 程度に保つとパーミアンスが6以上に上昇し、 $20 \text{ kOe}$ 程度の磁界で着磁が可能となる。

【0094】また、界磁用永久磁石323の着磁用コイルとして電機子31の電機子巻線を使用、すなわち、電機子31を着磁ヨークとして用いるのが好ましい。電機子31を着磁ヨークとして用いると、パーミアンスは3.4程度になるが、専用着磁ヨークを用いた場合と同様、 $20 \text{ kOe}$ の磁界で着磁が可能である。この場合には、専用着磁ヨークを省略することができる。

【0095】ところで、DCブラシレスモータの出力を大きくするためには、モータ外径を大きくし、電機子巻線を巻くスペースを大きくして起磁力を増加させ、回転子32の最大外径(最大直径)Dを大きく(図2参照)、かつ、磁石量を増加させて、有効磁束数を増加させるとともに、電機子起磁力の増加による減磁を防止するために、磁石の厚さを大きくしてパーミアンスを高く設定する。

【0096】一方、DCブラシレスモータの出力を小さくするため(小さくてもよい場合)には、前記とは逆に、回転子32の最大外径Dを小さく、磁石の厚さを小さくする。

【0097】このように、回転子32の最大外径Dと、磁石の厚さ(スロット322の径方向寸法Lm) + エアギャップ長Lg、特に、回転子32の最大外径Dと、磁石の厚さとは正の相関関係にある。

【0098】よって、スロット322の径方向寸法Lmと、エアギャップ長Lgと、回転子32の最大外径Dとの関係( $L_m + L_g$ と、Dとの関係)が下記(1)式を満足するように設定され、好ましくは、下記式(2)式を満足するように設定される。

【0099】

$$\dots \quad (1)$$

$$\dots \quad (2)$$

【0100】なお、 $L_m + L_g$ の下限値は、前述したように製造上の理由等から、 $0.3 \text{ mm}$ 程度が好ましい。す

なわち、より好ましくは、 $L_m$ と、 $L_g$ と、 $D$ との関係が下記(3)式を満足するように設定され、さらに好ましくは、

$$0.3 \text{ mm} < L_m + L_g \leq 2 \times D / 5.1 \quad \dots \quad (3)$$

$$0.3 \text{ mm} < L_m + L_g \leq 1.3 \times D / 5.1 \quad \dots \quad (4)$$

なお、本発明では、DCブラシレスモータ3は、図2に示す構成のものに限定されず、この他、例えば、図9に示すように、主磁極10の1つおきにスロット9が形成され、そのスロット9に界磁用永久磁石11が埋め込まれた構成であってもよい。

【0102】このように、主磁極10の1つおきに界磁用永久磁石11が埋め込まれている場合でも、前述した本実施例と同様に、 $L_m + L_g$ が所定の不等式を満足するよう設定される。但し、この場合には、回転子ヨークのスロット9の径方向寸法（磁石厚さ方向の寸法）の1/2を $L_m$ とする。

【0103】次に、本発明の制御装置について詳細に説明する。図10は、本発明の制御装置の構成例を示すブロック図である。

【0104】同図に示すように、制御装置のインバータ制御部6は、速度検出手段61、電流指令値作成部62および電流制御部63で構成されている。

【0105】回転子位置検出手段4は、例えば、ロータリーエンコーダによって構成され、その出力信号、すなわち、回転子位置信号 $\theta$ は、電流指令値作成部62に供給されるとともに、速度検出手段61に供給され、速度検出手段61で速度信号 $\omega$ に変換される。

【0106】電流指令値作成部62は、速度指令値 $\omega^*$ と、回転子位置信号 $\theta$ とに基づいて、3相電機子電流振幅・位相の指令値を算出し、3相電機子電流値 $i_u^*$ 、 $i_v^*$ 、 $i_w^*$ を作成する。

【0107】電流制御部63は、3相電機子電流指令値 $i_u^*$ 、 $i_v^*$ 、 $i_w^*$ に対して、電流検出手段5からの検出電流と、速度検出手段61からの速度信号 $\omega$ とに基づき、電流値を補正し、インバータ2の各スイッチ素子（パワー素子）に印加する電圧指令値（ゲート信号）を作成する。

【0108】この場合、電流制御部63では、図11に示す電流ベクトル軌跡に沿って電流値を補正する。

【0109】例えば、図11中、①連続定格電流値 $I_{mr}$ のd軸、q軸成分である $i_{qr}$ 、 $i_{dr}$ で囲まれている円弧の範囲、② $i_{qav}$ の円弧と、 $i_{dr}$ の直線で囲まれる範囲（d軸電流 $i_d$ が $I_{mr}$ を超えない範囲）、③ $i_{qav}$ 、 $i_{dmax}$ で囲まれる円弧の範囲で運転されるよう補正し、電機子電流を制御する。前記 $i_{qr}$ 、 $i_{dr}$ は、モータとして最大限必要なトルクを発生する電流値であり、通常、 $I_{mr}$ の2~4倍程度である。なお、前記①の範囲を超える範囲での運転（②、③の運転）は、比較的短い時間のみ可能とする（許可する）のが好ましい。

【0110】図11中、連続定格電流値 $I_{mr}$ のd軸、q軸成分である $i_{qr}$ 、 $i_{dr}$ で囲まれている円弧の範囲で運

\* しくは、下記式(4)式を満足するように設定される。  
【0101】

$$\dots \quad (3)$$

$$\dots \quad (4)$$

転するよう制御すれば連続運転が可能となる。図4および図5に示すモータ出力特性では、図11の $i_{qr}$ 、 $i_{dr}$ で囲まれた円上の軌跡をたどる。

【0111】また、 $i_{qav}$ の円弧と、 $i_{dr}$ の直線で囲まれる範囲で運転するよう制御すれば、出力トルクを増加させることができが、かつ界磁用永久磁石を不可逆減磁から守ることができる。

【0112】また、 $i_{qav}$ 、 $i_{dmax}$ で囲まれる円弧の範囲で運転するよう制御すれば、最高回転数をさらに向上させることができ、運転範囲を拡大することができるが、運転時のモータ温度を観測し、界磁用永久磁石の不可逆減磁に注意する必要がある。

【0113】なお、本実施例では回転子位置検出手段4としてロータリーエンコーダを用いたが、本発明では、回転子位置検出手段は、特に限定されず、前記ロータリーエンコーダの他、例えば、位置センサレス制御等により回転子位置を検出する手段を用いればよい。

【0114】（実施例2）図12、図13および図14は、それぞれ、本発明のDCブラシレスモータの回転子の他の構成例を示す平面図である。なお、DCブラシレスモータの電機子や制御装置の構成は、前述した実施例1と同一であるので説明を省略する。

【0115】図12に示すように、このDCブラシレスモータの回転子は、外周部に2つ以上（本実施例では4つ）の主磁極7を有する回転子ヨークを備えている。この回転子ヨークは、積層された複数枚の鋼板（金属板）により構成されている。

【0116】回転子ヨークの各主磁極7には、それぞれ、スロット71が形成されている。そして、各スロット71には、それぞれ、界磁用永久磁石72が埋め込まれている。

【0117】回転子ヨークの隣接する主磁極7と主磁極7との間には、回転子ヨークの一部を突出させた補助突極8が形成され、補助突極8と図示しない電機子との間には、所定長さ（一定の長さ）のエアギャップが形成されている。

【0118】これら補助突極8は、回転子ヨークの回転軸の中心部から放射線状（径方向）に突出している。

【0119】この場合、補助突極8の先端部と、主磁極7の先端部とは、所定距離離間している。すなわち、補助突極8の先端部は、主磁極7から分離・独立して形成されている。これにより、主磁極7から発生する主磁束の漏洩磁束を最小限に留めることができる。また、補助突極8を設けることにより、q軸インダクタンスを増加させることができる。

【0120】各補助突極8は、棒状であり、その断面積

は、径方向に沿ってほぼ一定である。

【0121】また、回転子ヨークの回転軸の中心部から放射状に突出した補助突極8の先端部までの長さは、回転子ヨークの回転軸の中心部から主磁極7の先端部までの長さにとほぼ同一に設定されている。なお、この回転子を回転子Aとする。

【0122】図13に示すように、このDCブラシレスモータの回転子は、補助突極8の形状のみが前述した回転子Aと異なり、これ以外はほぼ同一である。

【0123】補助突極8は、先端部に、先端に向ってその断面積が漸増する部分を有している。すなわち、補助突極8は、その先端部が基端部に比べ広がっている。なお、この回転子を回転子Bとする。

【0124】図14に示すように、このDCブラシレスモータの回転子は、補助突極8の形状のみが前述した回転子Bと異なり、これ以外はほぼ同一である。

【0125】補助突極8は、先端部に、先端に向ってその断面積が漸増する部分を有している。この場合、断面積は先端まで漸増しており、前述した回転子Bよりも補助突極8の先端部の広がりが大きい。なお、この回転子を回転子Cとする。

【0126】次に、本実施例をさらに詳細に説明する。前記数1から電力を求め、電力／回転角速度で求めることができるDCブラシレスモータの発生する瞬時トルク $\tau$ は、次式で示される。

【0127】

【数5】

$$\tau = p_p \{ \phi_{mag} i_q + (L_q - L_d) i_d i_q \}$$

【0128】ここで、数5の右辺第1項は、界磁用永久磁石72によるアクティブトルクであり、右辺第2項は、リラクタンストルクを示している。また、 $p_p$ は、極対数を示す。 $q$ 軸インダクタンスが $d$ 軸インダクタンスよりも大きい逆突極性を有するDCブラシレスモータのトルクは、前記2種類のトルクの合成である。尚 $i_d$ 、 $i_q$ は、次式で定義する。

【0129】

【数6】

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_m \begin{bmatrix} \sin \phi \\ \cos \phi \end{bmatrix}$$

【0130】数6の $\phi$ は、 $q$ 軸からの電流位相角、 $I_m$ は、電機子電流を表している。

【0131】本実施例では、以上の通り主磁極間に補助突極8を設けることにより、電機子起磁力による磁束を回転子ヨーク内部に通すことで $q$ 軸インダクタンスを大きくすることができ、出力トルクを増加させることができる。

【0132】図15に本実施例のDCブラシレスモータ(回転子A、B、C)の発生するトルクの平均値と、従

来例におけるトルクの平均値とを示す。なお、それぞれ、8 Aの電機子電流での最大トルクを表している。

【0133】同図に示すように、補助突極8を設けることにより、従来例に比べて、それぞれ、トルクが約5%向上する。その結果、同一トルクを発生させる場合には、電機子電流値を減少させることができる。この場合、例えば、3500 rpmでは、モータ効率が1%程度上昇し、1000 rpmでは、モータ効率が2%程度上昇した。

【0134】図15ではトルクの平均値を示したが、次に、図16に、図12～図14に示す回転子A～Cを有するモータの発生する瞬時トルクを示す。

【0135】図16は、電気角で90度(機械角で45度)区間の瞬時トルクを解析により求め、その結果を示したグラフである。

【0136】同図に示すように、回転子Aのトルクの脈動が最も大きく、回転子B、回転子Cと漸次トルクの脈動が小さくなっている。このため、補助突極の形状は、回転子Aよりも回転子Bが好ましく、回転子Bよりも回転子Cが好ましい。

【0137】次に、回転子A～Cにおける主磁極7と補助突極8との位置関係を説明する。図17は、主磁極7、補助突極8およびこれらの近傍を示す平面図である。

【0138】同図に示すように、電機子ヨークの巻線部スロット幅角度寸法を $\theta_1$ 、スロット歯部角度寸法を $\theta_2$ とし、回転子の主磁極7の周方向端部(主磁極端部)から補助突極8の周方向端部(補助突極端部)までの角度寸法を $\gamma$ とするとき、回転子Aでは、 $\gamma = \theta_1 + \theta_2$ の関係にあり、回転子Bでは、 $\gamma = \theta_1 + (3/2) \times \theta_2$ 、回転子Cでは、 $\gamma = \theta_1 + 2\theta_2$ の関係にある。

【0139】瞬時トルクの最大値と最小値との差をトルク脈動としたとき、トルク脈動と $\gamma$ との関係を図18に示す。

【0140】同図に示すように、 $\gamma = \theta_1 + \theta_2$ のとき、すなわち $\gamma$ が電機子スロットの1ピッチ角度と同一の場合には、トルク脈動が大きい。そして、 $\gamma$ を $\gamma = \theta_1 + \theta_2$ から大きくしていくとトルク脈動は減少し、さらに $\gamma$ を大きくして、 $\gamma = \theta_1 + 2\theta_2$ の関係にある回転子Cの構造で補助突極8によるトルクを正の値だけにすることができる。この $\gamma = \theta_1 + 2\theta_2$ の関係にある回転子Cの構造が、最もトルク脈動の小さい構造である。

【0141】よって、補助突極8を設けることにより、トルクを増大させることができるが、トルク脈動を減らす為には、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ および $\gamma$ が、 $\gamma > \theta_1 + \theta_2$ の関係を満足するよう( $\gamma$ が電機子スロットの1ピッチ角度よりも大きい)設定されてるのが好ましく、 $\gamma \geq \theta_1 + (3/2) \times \theta_2$ の関係を満足するよう設定されているのがより好ましく、 $\gamma = \theta_1 + 2\theta_2$ の関係を満足する

よう ( $\gamma$  が  $\theta_1 + 2\theta_2$  付近の値になるよう) 設定されているのが特に好ましい。

【0142】また、回転子ヨークの回転軸の中心部から放射状に突出した補助突極8の先端部までの長さと、回転子ヨークの回転軸の中心部から主磁極7の先端部までの長さとの関係によって出力トルクの増加の度合い、およびトルク脈動の大きさが変化する。

【0143】前記補助突極8の先端部までの長さは、回転子ヨークの回転軸の中心部から主磁極7の先端部までの長さより長く、かつ、回転子ヨークの回転軸の中心部から主磁極7の先端部までの長さにエアギャップ長Lgを加えた長さよりも短く設定されているのが好ましい。この場合には、補助突極8によるトルクが増加するので、さらに、出力トルクの増加を図ることができる。

【0144】なお、本実施例では、前記補助突極8の先端部までの長さと、回転子ヨークの回転軸の中心部から主磁極7の先端部までの長さとがほぼ同一に設定されているが、本発明では、前記補助突極8の先端部までの長さは、回転子ヨークの回転軸の中心部から主磁極先端部までの長さより短く設定されていてもよい。

【0145】前記補助突極8の先端部までの長さを回転子ヨークの回転軸の中心部から主磁極7の先端部までの長さより短く設定することで補助突極8によるトルクは減少するが、トルク脈動を減少させることができる。

【0146】なお、本発明では、この実施例2の構成と、前述した実施例1の構成とを任意に組み合わせてもよい。

【0147】(実施例3) 図19は、本発明のDCブラシレスモータの回転子の他の構成例を示す平面図である。なお、DCブラシレスモータの電気子や制御装置の構成は、前述した実施例1と同一であるので説明を省略する。

【0148】同図に示すように、このDCブラシレスモータの回転子は、外周部に2つ以上(本実施例では4つ)の主磁極12を有する回転子ヨークを備えている。この回転子ヨークは、積層された複数枚の鋼板(金属板)により構成されている。

【0149】回転子ヨークの各主磁極12には、それぞれ、径方向寸法がLmのスロット121が形成されている。そして、各スロット121は、それぞれ、厚さがほぼLm(スロット121の径方向寸法Lmとほぼ同一)の界磁用永久磁石122が埋め込まれている。

【0150】この場合、スロット121の径方向寸法Lm、エアギャップ長Lg、回転子の最大外径D等は、前述した実施例1と同様に設定されている。

【0151】回転子ヨークの隣接する主磁極12と主磁極12との間には、回転子ヨークの一部を突出させた補助突極13が形成され、補助突極13と図示しない電気子との間には、所定長さ(一定の長さ)のエアギャップが形成されている。

【0152】これら補助突極13は、回転子ヨークの回転軸の中心部から放射線状(径方向)に突出している。この場合、補助突極13の先端部と、主磁極12の先端部とは、所定距離離間している。すなわち、補助突極13の先端部は、主磁極12から分離・独立して形成されている。

【0153】この場合、電機子ヨークの巻線部スロット幅角度寸法 $\theta_2$ 、スロット歯部角度寸法 $\theta_1$ 、回転子の主磁極12の周方向端部(主磁極端部)から補助突極13の周方向端部(補助突極端部)までの角度寸法 $\gamma$ 、回転子ヨークの回転軸の中心部から放射状に突出した補助突極13の先端部までの長さ、回転子ヨークの回転軸の中心部から主磁極12の先端部までの長さ等は、前述した実施例2と同様に設定されている。

【0154】このように、本実施例のDCブラシレスモータの回転子は、実施例1における回転子の構成と、図12～図14に示す実施例2における回転子の構成とを組み合わせたものである。

【0155】従って、本実施例のDCブラシレスモータは、実施例1および実施例2のDCブラシレスモータそれぞれの利点を併有している。

【0156】すなわち、本実施例のDCブラシレスモータでは、例えば、連続定格電流での運転回転数範囲を2倍以上、特に4倍以上に拡大することができる。しかも、q軸インダクタンスを大きくできるので、出力トルクを増加させることができる。

【0157】なお、同一の界磁用永久磁石の厚さを薄くしていくと、有効な磁束は減少していく。そのため、同一電機子電流で同等の出力トルクを得るには、残留磁束密度の高い永久磁石を使用しなければならないが、本実施例では、リラクタントトルクを増大でき、これにより出力トルクを増加させることができるので、界磁用永久磁石を変更することなく、同一電機子電流で同等の出力トルクを得ることができるという利点を有する。

【0158】本発明のDCブラシレスモータの用途は特に限定されず、前述した電気スクーター、電気自動車、フォークリフト等の移動体(電気車)の駆動用モータの他、本発明のDCブラシレスモータは、例えば、OA機器、MDのスピンドルモータ、FAのサーボモータ、エアコン用コンプレッサ等に適用することができる。

【0159】以上、本発明のDCブラシレスモータおよび制御装置を、図示の構成例に基づいて説明したが、本発明はこれらに限定されるものではない。

【0160】例えば、前記各実施例では、埋め込み磁石型の回転子を有するDCブラシレスモータで説明したが、本発明では、表面磁石型の回転子を有するDCブラシレスモータでもよい。

【0161】また、前記各実施例では、界磁用永久磁石の断面形状は矩形であるが、本発明では、界磁用永久磁石の形状は図示のものに限定されず、この他、例えば、

瓦状(円弧状)であってもよい。

【0162】

【発明の効果】以上のように、本発明のDCブラシレスモータおよび制御装置によれば、モータの運転範囲を拡大することができる。

【0163】例えば、エアギャップ長 $L_g$ を小さくし、界磁用永久磁石の厚さを薄くする(スロットの径方向寸法 $L_m$ を界磁用永久磁石の厚さに合わせて小さくする)ことにより、電気子反作用を受け易くなり、電機子電流が連続定格の範囲内で、運転範囲を2倍以上、特に4倍以上拡大することができる。

【0164】特に、エアギャップ長 $L_g$ と、スロットの径方向寸法 $L_m$ と、回転子の最大外径 $D$ との関係が、 $0 < L_m + L_g \leq 2D / 5$ を満足するよう設定される場合には、回転子の外径に対応して前述したような効果を得られる。

【0165】また、本発明では、従来よりも磁石の厚さを薄くすることにより、磁石使用量を減少させることができるので、コストを低減することができる。

【0166】また、界磁用永久磁石が主磁極に挿入された状態で着磁されたものである場合には、界磁用永久磁石の着磁時のパーミアンスが増加するので、着磁が容易となり、また、有効磁束数を増加させることができる。

【0167】界磁用永久磁石の着磁用コイルとして電機子の電機子巻線を使用する場合には、着磁用の専用ヨークを必要とせず、また、界磁用永久磁石を未着磁のまま、電機子内部に組み込めるので、磁気吸引力の影響を受けず、よって、生産性の向上に寄与する。

【0168】回転子ヨークの隣接する主磁極と主磁極との間に回転子ヨークの一部を突出させた補助突極が形成され( $q$ 軸方向に補助突極が形成され)、かつ、補助突極と電機子との間に所定長さのエアギャップが形成されている場合には、 $q$ 軸インダクタンスを増加させることができるので、リラクタンストルクが大きくなり、モータトルクを増大させることができる。また、同一トルクを発生させる場合には、電機子電流値を減少させることができるので、効率が向上する。

【0169】電機子ヨークの巻線部スロット幅角度寸法 $\theta_2$ 、電機子ヨークのスロット歯部角度寸法 $\theta_1$ 、回転子の主磁極端部から補助突極端部までの角度寸法 $\gamma$ が、 $\gamma > \theta_1 + \theta_2$ 、特に、 $\gamma = \theta_1 + 2\theta_2$ の関係を満足するよう設定されている場合には、脈動トルクを低減することができるので、モータの回転をより円滑にすることができます。

【0170】また、本発明の制御装置によれば、界磁用永久磁石を不可逆減磁から守ることができるので、モータの性能を低下させることなくモータを駆動させることができます。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明のDCブラシレスモータおよび制御装置

の構成例を示すブロック図である。

【図2】本発明のDCブラシレスモータの構成例を示す要部断面図である。

【図3】DCブラシレスモータの簡略化した磁気回路構成を示す回路図である。

【図4】本発明1のDCブラシレスモータの出力特性を示すグラフである。

【図5】本発明2のDCブラシレスモータの出力特性を示すグラフである。

10 【図6】本発明のDCブラシレスモータの $L_m + L_g$ と、增速比との関係を示すグラフである。

【図7】本発明に適用される永久磁石の動作を説明するグラフである。

【図8】本発明に適用される永久磁石の磁石表面磁束密度と、磁石幅方向での位置との関係を示すグラフである。

【図9】本発明における回転子の他の構成例を示す平面図である。

20 【図10】本発明の制御装置の構成例を示すブロック図である。

【図11】本発明における電流ベクトル軌跡を示すグラフである。

【図12】本発明における回転子の他の構成例を示す平面図である。

【図13】本発明における回転子の他の構成例を示す平面図である。

【図14】本発明における回転子の他の構成例を示す平面図である。

30 【図15】図12～図14に示すDCブラシレスモータおよび従来のDCブラシレスモータが発生するトルクを示すグラフである。

【図16】図12～図14に示すDCブラシレスモータが発生する電気角90度区間の瞬時トルクを示すグラフである。

【図17】本発明における主磁極、補助突極およびこれらの近傍を示す平面図である。

【図18】本発明におけるトルク脈動と $\gamma$ との関係を示すグラフである。

40 【図19】本発明における回転子の他の構成例を示す平面図である。

【図20】従来のDCブラシレスモータの埋め込み型回転子を示す平面図である。

【図21】従来のDCブラシレスモータの出力特性を示すグラフである。

【符号の説明】

1 直流電源

2 3相PWMインバータ

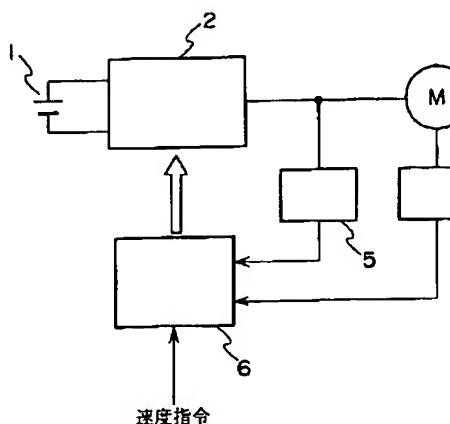
3 DCブラシレスモータ

31 電機子

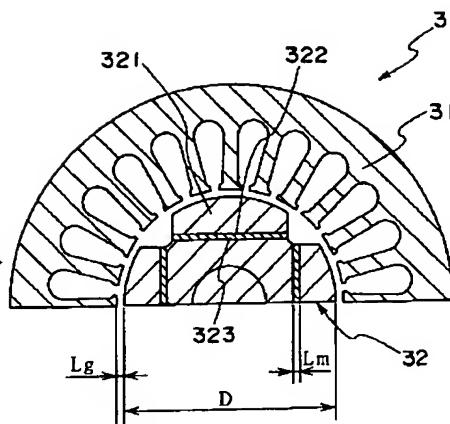
32 回転子

321	主磁極	* 71	スロット
322	スロット	72	界磁用永久磁石
323	界磁用永久磁石	8	補助突極
4	回転子位置検出手段	9	スロット
5	電流検出手段	10	主磁極
6	インバータ制御部	11	界磁用永久磁石
61	速度検出手段	12	主磁極
62	電流指令値作成部	121	スロット
63	電流制御部	122	界磁用永久磁石
7	主磁極	* 10 13	補助突極

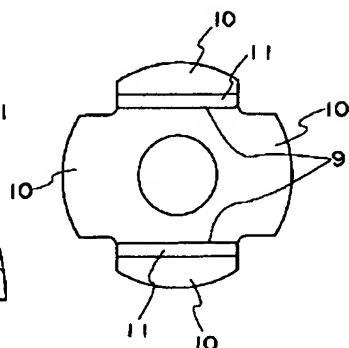
【図1】



【図2】

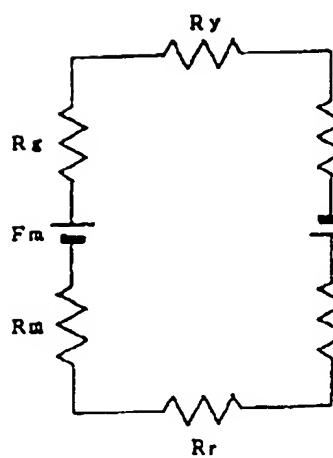


【図9】

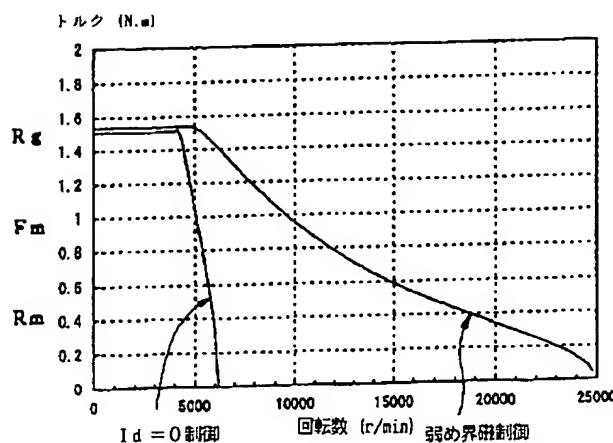


【図12】

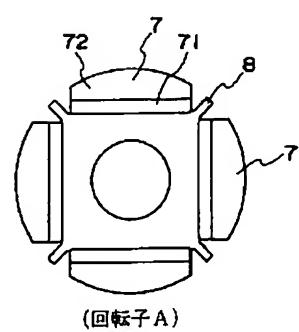
【図3】



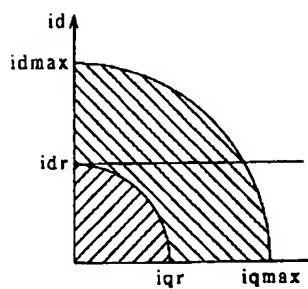
【図4】



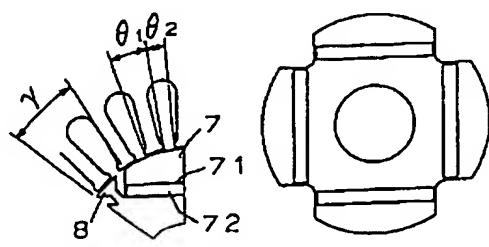
【図14】



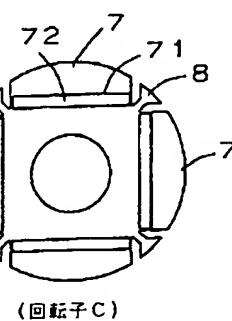
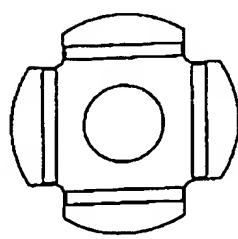
【図11】



【図17】

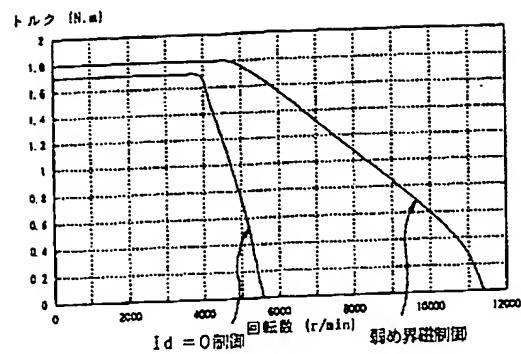


【図20】

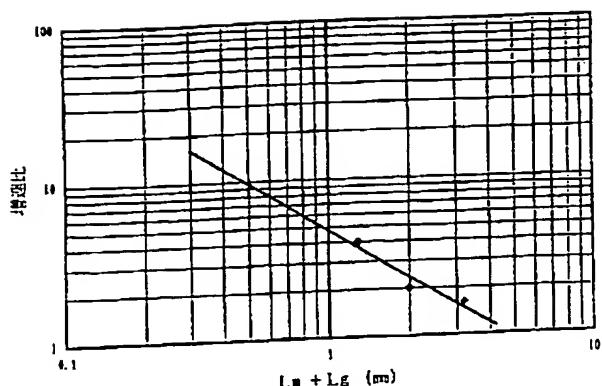


(回転子C)

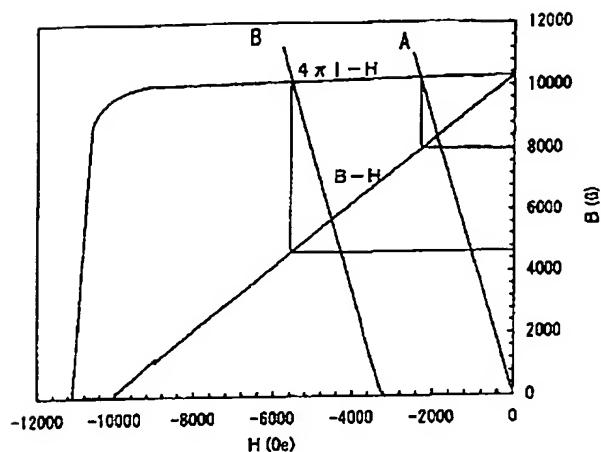
【図5】



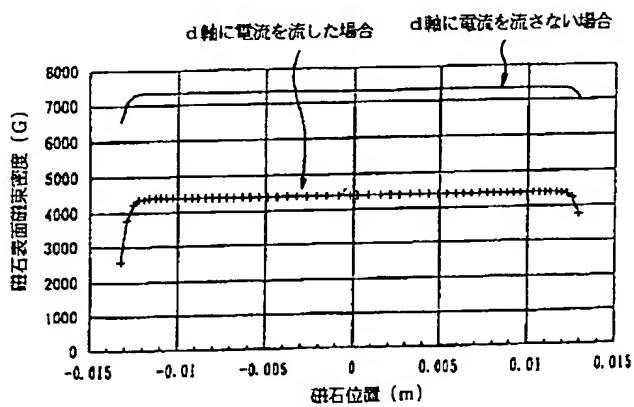
【図6】



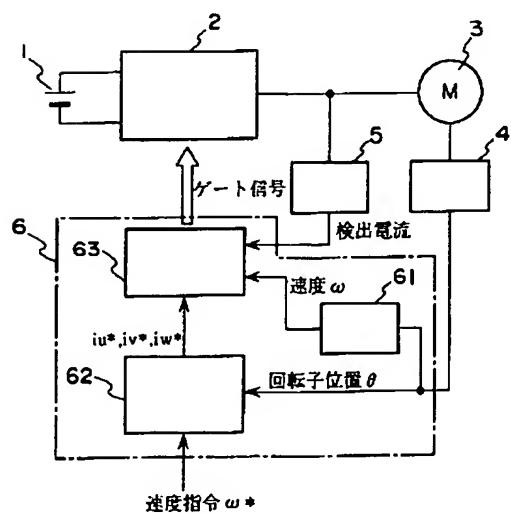
【図7】



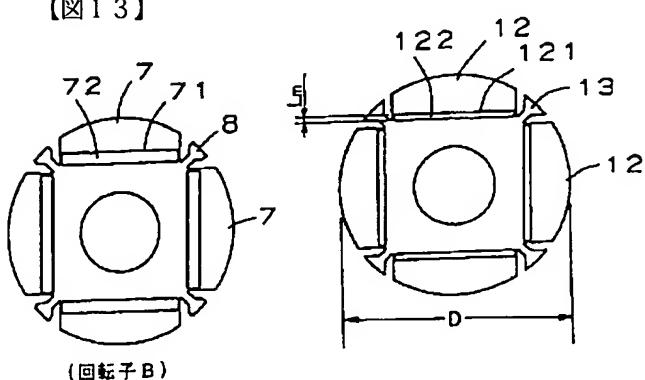
【図8】



【図10】

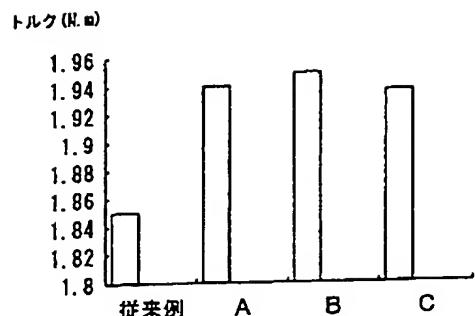


【図13】

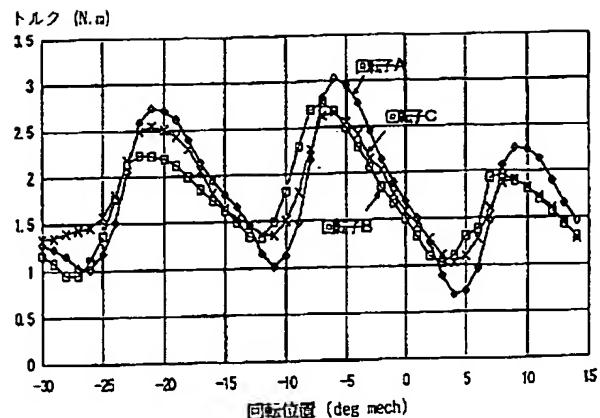


【図19】

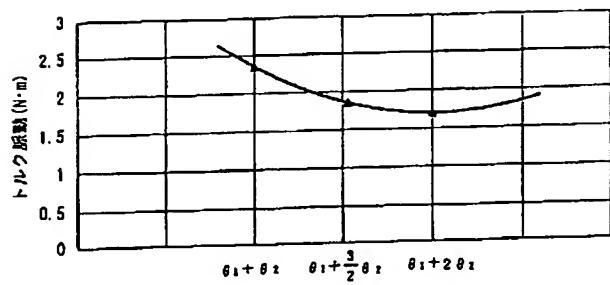
【図15】



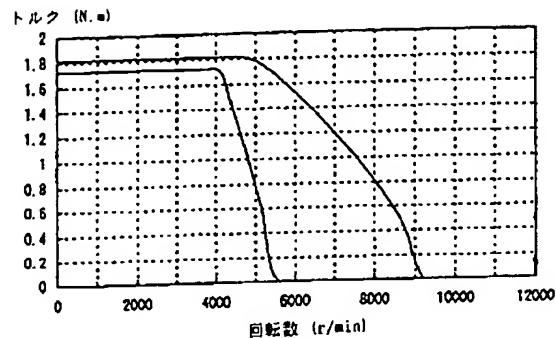
【図16】



【図18】



【図21】



フロントページの続き

(51) Int.Cl.<sup>6</sup>

H 02 K 1/27

識別記号

501

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

501 E

501 H

21/16

21/16

H 02 P 6/06

H 02 P 6/02

M

321 A